Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Feasibility of the Performance of Thermal Photovoltaic Systems in Residential Units in the Climate of Four Cities of Abadan, Baghdad, Basra, and Tehran in Terms of Energy Saving

Research Article

Ali Jabri[1], Mohammad Reza Ansari[2], Mahdi Marefat[3]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.79017.1141

1. Introduction

In order to increase the efficiency in solar energy applications, researchers have proposed the combination of two solar collector and thermal photovoltaic systems in series. By using combined solar collector and thermal photovoltaic systems, the output temperature of water can be increased, which increases the thermal efficiency.

Based on the literature review, the feasibility of using PVT-ST has been investigated in only one published article for the city of Shanghai, China. Therefore, it is necessary to analyze the performance of the PVT-ST system in different cities in one year to evaluate its potential for use in different climates and cities. For this purpose, a 2D mathematical model was developed to evaluate the performance of the system in terms of thermal and electrical power. Tehran, Abadan, Baghdad, and Basra were selected for this study due to the suitable weather conditions and suitable solar radiation for about a year, which is very suitable for solar systems. A comparative study was conducted between PVT-ST, PVT and ST systems and the performance of the system in four selected cities in six months was investigated, respectively. For the first time, the effects of using the laminar and turbulent regime of the PVT-ST system were investigated. And then the impact proposed system on the selected cities are investigated. The supply of heating as well as the supply of electricity required by this equipment was investigated with the help of Carrier software for a building in four different cities of Abadan, Basra, Baghdad, and Tehran.

2. Proposed solar system

Figure 1 shows the PVT-ST diagram for the simultaneous supply of electricity and thermal energy required for a residential unit. As can be seen, PVT-ST consists of two separate parts of PVT and ST, which are connected by a pipeline. The PVT system consists of several layers, including, from top to bottom, glass cover, PV panel, absorber plate, pipes and insulation. The ST system consists of a glass cover on top of the absorber plate to increase solar absorption by the absorber plate, pipes connected to the absorber plate and insulation. The solar collector is made of copper with spiral tubes.

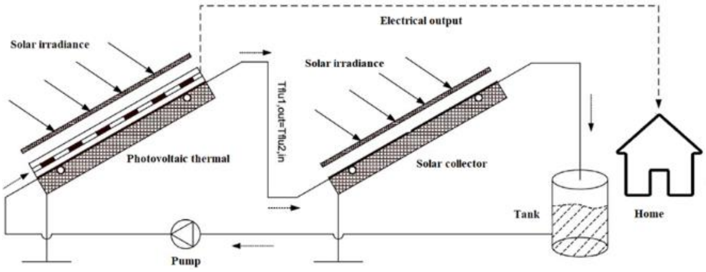


Figure 1. Schematic of PVT-ST

3. Results and discussion

3.1. Investigating the hourly performance of the PVT-ST system under laminar and turbulent regimes

In order to understand the thermal and electrical behavior of the PVT-ST system, the electrical and thermal power produced on a typical July day in Tehran was investigated. For this purpose, the hourly outlet temperature of the working fluid and the temperature of the PV surface are discussed first. The results are plotted in Figure 2 for different mass flow rates to consider both quiescent and turbulent regimes. Therefore, three mass flow rates of 0.00394, 0.00788 and 0.01182 kg/s are considered for the calm regime and three mass flow rates of 0.02252, 0.02646 and 0.0304 kg/s are considered for the turbulent regime. Figure 2 shows that the outlet temperature increases to a maximum around 11:00 AM for all mass flow rates, when the system receives more solar radiation. In addition, the mass flow rate in the laminar regime has a higher outlet temperature than in the turbulent regime. The 11:00 AM setting as a baseline for comparison, using a mass flow rate of 0.00394 kg/s, provides an outlet temperature of about 333.16 K, which decreases to 319.1 K (a 4.2 percent decrease) with a mass flow rate of 0.01182 kg/s. The use of turbulent flow reduces the outlet temperature even more. However, as the mass flow rate increases from 0.02252 to 0.0304 kg/s, the outlet temperature at 11:00 AM only decreases by 0.4%. This shows that the impact of mass flow rate on outlet temperature decreases with the increase of mass flow rate, especially in the turbulent regime.

*Manuscript received: October 2, 2022. Revised, December 7, 2022, Accepted, March 19, 2023.

[1]. Mechanical Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

[2]. Corresponding author. Professor Mechanical Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.
Email:mra_1330@modares.ac.ir

[3]. Mechanical Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.

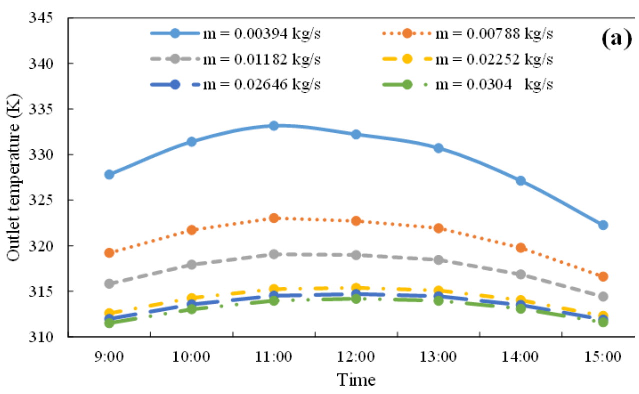


Figure 2. The variation of outlet temperatures

3.2. PVT-ST in four cities

Finally, in this section, the performance of the proposed system is evaluated under weather conditions in Tehran, Abadan, Baghdad and Basra for six months of the year. It should be noted that all four cities have hot weather with solar radiation and high ambient temperature. Moreover, based on the results for the mass flow rate (comparison of calm and turbulent regime), the mass flow rate of 0.0304 kg/s was chosen for this section due to its superiority in creating higher thermal and electrical power. In general, the proposed PVT-ST system can achieve satisfactory thermal efficiency compared to other systems with the same total collector area under the same operating conditions, while having the same performance in power generation. Moreover, the proposed PVT-ST system has better efficiency and performance in terms of thermal energy, with higher outlet water temperature than conventional PVT modules, along with energy generation. PVT-ST system can produce a significant amount of heat as a partial supplement to buildings.

In checking the inlet water temperature, it can be mentioned that water with a higher temperature absorbs less thermal energy. In other words, more thermal energy is directed to the PV cells, which leads to an increase in the output temperature and a decrease in the thermal efficiency. The results show that assuming the use of water inside the tank (we have considered the temperature of the incoming water to be equal to the ambient temperature), it can be seen that Basra has the highest thermal efficiency compared to the rest of the cities. The intensity of radiation in Basra is significantly higher than the rest of the cities

4. Examination of the residence building

In this part, we examine the amount of electricity consumed in the hot quarter of the year, i.e., summer. In this study, we examined the months of July, August and September. August has the highest electricity consumption due to the intense sun and heat. Then, assuming eight parallel systems to supply electricity to a residential house in the hot quarter of the year, we compare the electricity production capacity. As Figure 3 shows, in the early hours of the day due to more sunlight and the lack of use of lighting systems, the amount of electricity produced before 13:00 meets household consumption well, so that even the excess electricity can be stored. Moreover, in the early hours of the day, due to the lack of use of lighting equipment, the amount of electricity produced is more than the electricity consumed, and as before, the electricity produced can be stored until 13:00. But after 13:00 in Figure 3, due to more use of electronic equipment, the amount of consumption increases, so that the produced electricity is not able to supply the home's consumption. As mentioned, due to the minimal amount of consumption in the early hours of the day, it is possible to store the produced electricity and use that capacity during the peak hours of consumption.

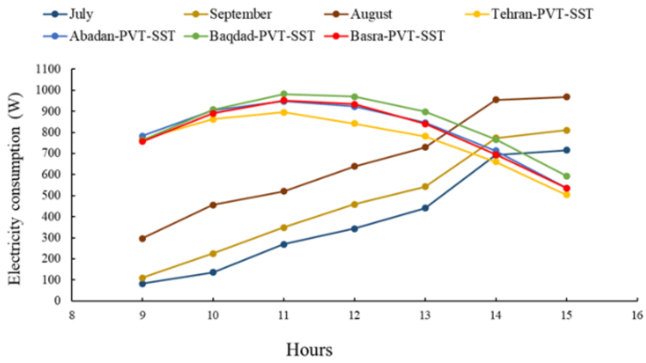


Figure 3. Hourly graph of the amount of electricity consumed in hot and cold quarters for cooling the house and comparing it with the parallel system in four different climates

5. Conclusion

In this article, for the first time, the potential and feasibility of using PVT-ST in relatively warm and moderate weather conditions (that is, in Tehran, Abadan, Baghdad, and Basra). The analysis of the working fluid regime shows that the optimal thermal and electrical efficiency can be obtained in a turbulent regime. Considering the mass flow rate of 0.0304 kg/s (turbulent regime) in July, the thermal efficiency of ST, PVT-ST and PVT systems are 85.7%, 78% and 72.9%, respectively. Finally, the investigation of PVT-ST system performance in different cities shows that this system can produce the highest thermal power in Basra. However, the maximum power generation with an average of 77 watts per square meter belongs to Baghdad. Finally, the energy supply of a residential house by combined systems was investigated. By considering eight combined systems, it is possible to supply most of the electricity consumed by a residential house, but it should be kept in mind that during the peak hours of consumption, this amount of electricity production does not meet the capacity of the house, which can also be used from the electricity stored in the battery.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران
دانشگاه فردوسی مشهد

امکان‌سنجی عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی درواحدهای مسکونی در آب و هوای چهار شهر آبادان، بغداد، بصره و تهران از لحاظ صرفه‌جویی در انرژی*

مقاله پژوهشی

علی جبری[۱] محمد رضا انصاری[۲] مهدی معرفت[۳]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.79017.1141

چکیده کلکتورهای حرارتی خورشیدی (ST) فقط می‌توانند نیروی حرارتی تولید کنند، در حالی که سیستم‌های حرارتی فتوولتائیک (PVT) می‌توانند هم برق و هم انرژی حرارتی را تامین کنند. با این حال، دمای خروجی PVT معمولا به اندازه کافی برای استفاده در کاربردهای مختلف مانند گرمایش فضا بالا نیست. بنابراین سیستم جدیدی به نام ماژول PVT و کلکتور ST به‌صورت سری (PVT-ST) القا می‌شود تا با دمای خروجی بالاتر، برق و توان حرارتی تولید کند. در این مقاله برای اولین بار به‌منظور بررسی پتانسیل و امکان‌سنجی استفاده از PVT-ST در شرایط آب و هوایی نسبتا گرم و معتدل در چهار شهر تهران، آبادان، بغداد و بصره مورد مطالعه قرار گرفته است و با دو سیستم متداول PVT و ST مقایسه می‌شود. برای این منظور، عملکرد سامانه از نظر قوانین اول ترمودینامیک به‌صورت عددی مبتنی بر کد فرترن (Fortran) ارزیابی می‌شود و در ادامه با استفاده از نتایج بدست آمده به بررسی تحلیل انرژی مصرفی یک واحد مسکونی در ۴ شهر نام برده شده با استفاده از نرم‌افزار کریر(carrier) پرداخته شده است. علاوه بر این، اثرات نرخ جریان جرمی سیال عامل، در هر دو رژیم آرام و آشفته، بر عملکرد ماژول بررسی می‌شود. در این مطالعه تجزیه و تحلیل رژیم سیال کاری نشان می‌دهد که بازده حرارتی و الکتریکی بهینه را می‌توان در یک رژیم آشفته به دست آورد. با در نظر گرفتن دبی جرمی ۰،۰۳۰۴ کیلوگرم بر ثانیه (رژیم آشفته) در جولای، راندمان حرارتی سیستم‌های ST، PVT-ST و PVT به‌ترتیب ۸۵،۷٪، ۷۸٪ و ۷۲،۹٪ است، در نهایت، بررسی عملکرد سیستم در شهرهای مختلف نشان می‌دهد که این سامانه می‌تواند بالاترین توان حرارتی را در بصره تولید کند. با این حال، حداکثر تولید برق با میانگین ۷۷ وات بر متر مربع متعلق به بغداد است. در انتها به بررسی تامین انرژی یک منزل مسکونی توسط سیستم‌های ترکیبی پرداخته شده است. با در نظر گرفتن ۸ سیستم ترکیبی می‌توان بیشتر برق مصرفی یک خانه مسکونی را تامین نمود اما باید این نکته را در نظر داشت که در ساعات اوج مصرف این مقدار تولید برق پاسخگوی ظرفیت خانه نمی‌باشد که میتوان هم از برق ذخیره شده از باطری استفاده کرد و هم اینکه می‌توان کسری از کمبود برق را از شبکه شهری تامین نمود.

واژه‌های کلیدی کلکتور خورشیدی، سیستم فتوولتائیک حرارتی، صرفه‌جویی در انرژی، انرژی در ساختمان.

Feasibility of the Performance of Thermal Photovoltaic Systems in Residential Units in the Climate of Four Cities of Abadan, Baghdad, Basra, and Tehran in Terms of Energy Saving

Ali Jabri Mohammad Reza Ansari Mahdi Marefat

Abstract *In this paper, for the first time, to investigate the potential and feasibility of using PVT-ST in relatively hot and moderate weather conditions, it has been studied in four different cities and compared with two common solar systems, PVT and ST. Therefore, the performance of the system is evaluated in terms of the first and second laws of thermodynamics based on the FORTRAN code, and then using the obtained results to analyze the energy consumption of a residential unit in 4 different cities using Carrier software. In addition, the effects of the mass flow rate of the working fluid, in both laminar and turbulent regimes, on the module performance are investigated. Considering the mass flow rate of 0.0304 kg/s (turbulent regime) in July, the thermal efficiency of ST, PVT-ST, and PVT systems are 85.7%, 78%, and 72.9%, respectively. Finally, the investigation of system performance in different cities shows that this system can produce the highest thermal power in Basra. However, the maximum power generation with an average of 77 watts per square meter belongs to Baghdad. Finally, the energy supply of a residential house by combined systems has been investigated. By considering 8 integrated systems, most of the electricity consumption of a residential house can be supplied, but it should be kept in mind that during the peak hours of consumption if this amount of electricity production does not meet the capacity of the house, a fraction of the electricity shortage can be supplied from the stored electricity.*

Key Words Solar collector, thermal photovoltaic system, energy saving, energy in building.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۷/۱۰و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱/۱۶ می‌باشد.

(۱)دانشجو دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(۲) نویسنده مسئول، استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ایمیل

Email: mra_1330@modares.ac.ir

(۳)استاد، مهندسی مکانیک،دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مقدمه

برای افزایش راندمان در کاربردهای انرژی خورشیدی محققان ترکیب دو سامانه کلکتور خورشیدی و فتوولتائیک حرارتی را به‌صورت سری پیشنهاد داده‌اند . با استفاده از سیستم‌های ترکیبی کلکتور خورشیدی همراه با فتوولتائیک حرارتی میتوان دمای خروجی آب را افزایش داد که به موجب این افزایش راندمان حرارتی نیز افزایش می‌یابد [1].

در تحقیق فراح و همکاران با استفاده از یک مدل ریاضی یک بعدی عملکرد دو سیستم ترکیبی را برحسب فصول تابستان و زمستان مورد بررسی قرار دادند. آنها یک سامانه فتوولتائیک هوا خنک و یک کلکتور با سیال کاری آب را برای تابستان استفاده نمودند. در این حالت هوا گرمای اضافی را از سلولهای خورشیدی گرفته و به محیط میدهد و کلکتور خورشیدی آب گرم موردنیاز را تولید میکند. در حالی که برای فصل زمستان هر دو سیال کاری هر دو سیستم آب بوده است [2].

فکوریان و همکاران [3] به‌صورت تجربی یک سیستم ترکیبی کلکتور خورشیدی و فتوولتائیک حرارتی را در شرایط آب و هوایی تیرماه در شهر تهران مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد با استفاده از این روش بازدههای الکتریکی، حرارتی و کلی سامانه به‌ترتیب ۱۲/۳٪ ، ۴۹/۴٪، ۶۱/۷٪ خواهد بود که در مقایسه با سیستم‌های رایج افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد.

در شرایط عملیاتی ثابت، هان (Han) و همکاران [4] عملکرد سیستم‌های PV-ST و PVT-ST را به‌صورت عددی بررسی کرد. در سامانه قبلی، سیستم PV فقط برق تولید می‌کرد و دومی نیروی حرارتی را تامین می‌کرد. سامانه PVT-ST عملکرد بهتری را در تابش خورشیدی و دمای محیط بالاتر در مقایسه با سیستم PV-ST منعکس می‌کند. کاظمیان و همکاران با در نظر گرفتن یک روز در ماه جولای در شانگهای [1] سیستم‌های ST، PV، PVT و PVT-ST را به‌صورت عددی مقایسه کردند و تأثیر پارامترهای مختلف را بر عملکرد PVT-ST بررسی کردند. پارامترها نرخ جریان جرمی سیال کار، دمای ورودی، دمای محیط، تابش خورشیدی و سرعت باد بودند. آنها فقط رژیم آرام را در نظر گرفتند و نشان دادند که پس از تابش خورشیدی و دمای ورودی سیال عامل، دبی جرمی عامل تاثیرگذار بر توان حرارتی و الکتریکی سامانه است. چاندان (Chandan) و همکاران [5] اثرات استفاده از پوشش شیشه‌ای بر روی سامانه PVT-ST را به‌صورت تجربی و عددی ارزیابی کرد. آنها گزارش دادند که استفاده از یک پوشش شیشه‌ای در بالای سامانه می‌تواند دمای خروجی را حدود ۳-۲ درجه سانتی‌گراد افزایش دهد زمانی که سامانه PVT-ST به جای PVT استفاده شود. با این حال، توان الکتریکی PVT-ST شیشه‌ای ۲۳ درصد کمتر از بدون لعاب بود. این مطالعه به مدت یک روز در ماه فوریه در چنای هند انجام شد.

السلیمه و همکاران [6] استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک را در یک آپارتمان مسکونی استاندارد در کشور عمان مورد مطالعه قرار دادند. آنها یک آپارتمان در عمان را عنوان نمونه مطالعه برای انجام محاسبات انرژی و اقتصادی انتخاب کردند. نیاز برق و هزینه برای آپارتمان محاسبه شد. طراحی و هزینه سامانه PV برای تامین انرژی مورد نیاز محاسبه شد و مدت زمان بازگشت هزینه در سامانه ارائه شده با در نظر گرفتن عامل‌های نرخ تورم ثابت با قیمت برق مشخص محاسبه شده است. نتایج خروجی این مطالعه نشان می‌دهد که نصب سامانه PV در یک آپارتمان مسکونی در اردن ممکن است به دلیل هزینه بالای سیستم PV در مقایسه با هزینه برق شبکه، از نظر اقتصادی مفید نباشد. قانون تعرفه ورودی برق خورشیدی ممکن است به کاهش هزینه سیستم PV مانند مورد آلمان کمک کند. نتیجه‌گیری‌های اضافی این است که اگر سیستم‌های PV در مکان‌های دور از شبکه برق یا در تاسیسات برق PV در مقیاس بزرگ از راه دور برای غلبه بر محدودیت‌های اقتصادی فناوری PV استفاده شوند، ممکن است از نظر اقتصادی در اردن مفید باشند.

بر اساس بررسی ادبیات، امکان‌سنجی استفاده از PVT-ST تنها در یکی از مقالات منتشر شده برای شهر شانگهای چین بررسی شده است. بنابراین، تجزیه و تحلیل عملکرد سامانه PVT-ST در شهرهای مختلف در یک سال برای ارزیابی پتانسیل آن برای استفاده در آب و هوا و شهرهای مختلف ضروری است. برای این منظور، یک مدل ریاضی یک بعدی برای ارزیابی عملکرد سامانه از نظر توان حرارتی و الکتریکی توسعه داده شده است. علاوه بر این، سامانه بر اساس قانون دوم ترمودینامیک مورد مطالعه قرار گرفته است. چهار شهر تهران، آبادان، بغداد و بصره با توجه به شرایط آب و هوایی مناسب و تابش خورشیدی مناسب در حدود یک سال که بسیار مناسب برای سیستم‌های خورشیدی می‌باشد برای این مطالعه انتخاب شدند.

نتایج در سه بخش ارائه شده است: (۱) ابتدا، عملکرد سامانه در یک روز معمولی به مدت شش ماه، از جمله ژانویه، مارس، مه، جولای، سپتامبر و نوامبر، با در نظر گرفتن تجزیه و تحلیل انرژی، ارزیابی می‌شود. مطالعه تطبیقی بین سیستم‌های PVT-ST، PVT و ST انجام شده است و عملکرد سیستم در چهار شهر منتخب در شش ماه به‌ترتیب مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه برای اولین بار اثرات استفاده از رژیم آرام و آشفته سیستم PVT-ST بررسی شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند بینش بهتری نسبت به استفاده گسترده از سیستم‌های PVT-ST در مناطق با هوای گرم داشته باشد. همچنین تحقیقات کم و محدودی در مورد سیستم‌های ترکیبی و ارزیابی امکان حرارتی در بخش مسکونی انجام شده است. تامین گرمایش و همچنین تامین برق مورد نیاز این تجهیزات به کمک نرم‌افزارکریر برای ساختمانی در چهار شهر مختلف آبادان، بصره، بغداد و تهران بررسی گردیده است.

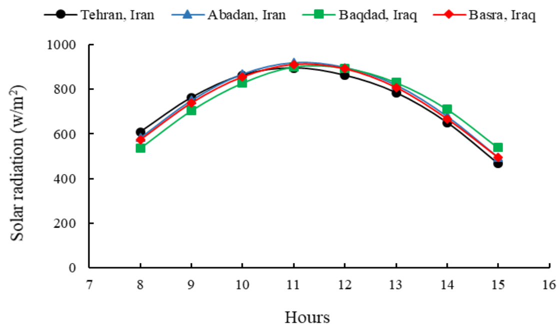
سیستم بررسی شده

سیستم ترکیبی کلکتور خورشیدی و فتوولتائیک حرارتی

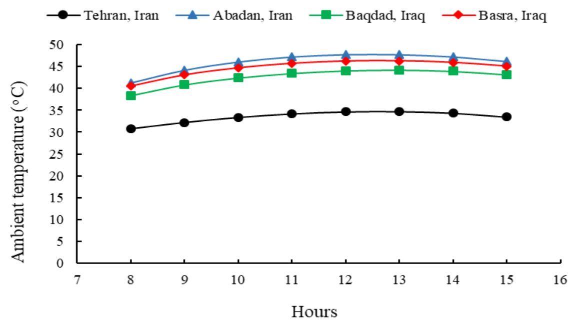
با توجه به تبدیل انرژی خورشیدی به برق یا انرژی حرارتی، سیستم‌های انرژی خورشیدی را می‌توان به سه نوع تقسیم کرد: ماژول‌های فتوولتائیک (PV)، کلکتورهای حرارتی خورشیدی (ST) و ماژول‌های حرارتی فتوولتائیک (PVT) که از جمله محبوب ترین آنها می‌توان به: بعضی از فناوری‌های مورد استفاده برای تولید برق، مانند کاشی های کف فتوولتائیک قابل راه رفتن [7] می‌توان اشاره کرد، نمای بتنی پیش ساخته ادغام شده با پانل‌های PV [8]، و ادغام با مواد تغییر فاز برای داشتن عملکرد الکتریکی بهتر [9]. با این حال، تولید الکتریکی ماژول‌های PV تنها ۱۰٪ تا ۲۰٪ تابش خورشیدی را تشکیل می‌دهد در حالی که بیشتر مابقی تبدیل به گرما می‌شود که منجر به افزایش دمای PV می‌شود. به همین ترتیب، راندمان الکتریکی به‌صورت خطی با افزایش دمای PV کاهش می‌یابد. همانطور که در مرجع [10] نشان داده شده است، کلکتور ST بیشتر تابش خورشیدی را جذب می‌کند و آن را به انرژی حرارتی با دمای متوسط تبدیل می‌کند، که توسط سیال فعال (عمدتا هوا، آب/روغن) استخراج می‌شود که می‌تواند مستقیما به عنوان آب گرم، کاربرد حرارتی در صنعت یا برای ذخیره سازی حرارتی استفاده نمود. ترکیبی از ماژول‌های PV و کلکتورهای ST، که ماژول PVT نامیده می‌شوند، برای خروجی برق و گرما به طور همزمان، ابتدا توسط مارتین و همکاران [11]، در سال ۱۹۷۶ مورد بررسی قرار گرفت. با این وجود، ماژول PVT تنها انرژی حرارتی با دمای پایین را همراه با سیال کاری با دمای پایین‌تر در مقایسه با کلکتور ST منفرد تولید می‌کند، در مطالعات [12] و [13] نشان داده شد که دمای آب خروجی از ماژول PVT معمولی معمولا کمتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد است. علاوه بر این، در زمانی که تابش خورشیدی کافی نیست (معمولا در زمستان، روزهای بارانی یا ابری)، انرژی کمکی مانند برق باید برای گرم کردن آب مصرف شود زیرا دمای آب خروجی برای کاربردهای مسکونی یا عمومی بسیار پایین است. بنابراین، یک ماژول PVT با یک کلکتور ST متصل به‌صورت سری (ساده شده به عنوان PVT-ST) پیشنهاد شده است که یک فناوری ترکیبی نوآورانه را ارائه می‌دهد که می‌تواند هم برق و هم انرژی حرارتی با دمای بالا تولید کند.

شرایط آب و هوایی شهرهای انتخابی

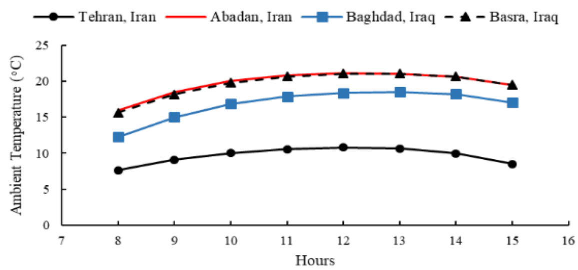
به‌منظور به دست آوردن داده‌های آب و هوایی شهرهای منتخب از نرم‌افزار System Advisor Model (SAM) استفاده شده است. با کمک این نرم‌افزار می‌توان متغیرهای مختلف آب و هوایی نظیر تشعشع خورشید و دمای محیط را برای نقاط مختلف جغرافیایی به‌صورت ساعتی، روزانه و ماهیانه به دست آورد. از این اطلاعات هم در بخش تحلیل عملکرد سیستم ترکیبی و هم محاسباتی حرارتی ساختمان استفاده خواهد شد. در شکل (۱) تا شکل (۵) به‌ترتیب تغییرات ساعتی تشعشع خورشید، دمای محیط و سرعت باد برای چهار شهرآبادان، بصره، بغداد و تهران نشان داده شده است. این داده‌ها به‌صورت ساعتی می‌باشد که با استفاده از نرم‌افزار SAM به دست آورده شده است.



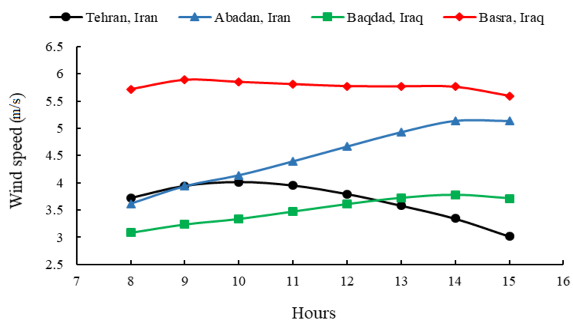
شکل ۱ نمودار میانگین شاردریافتی در سه ماهه تابستان در چهار شهر آبادان، بصره، بغداد و تهران



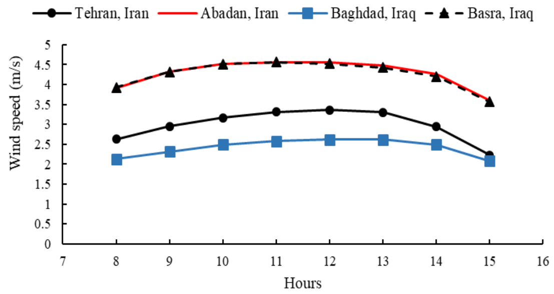
شکل ۲ نمودار میانگین دمای محیط در سه ماهه تابستان در چهار شهر آبادان، بصره، بغداد و تهران



شکل ۳ نمودار میانگین دمای محیط در سه ماهه زمستان در چهار شهر آبادان، بصره، بغداد و تهران



شکل ۴ نمودار میانگین سرعت باد در سه ماهه تابستان در چهار شهر آبادان، بصره، بغداد و تهران



شکل ۵ نمودار میانگین سرعت باد در سه ماهه زمستان در چهار شهر آبادان، بصره، بغداد و تهران

واحد مسکونی انتخابی و مصرف انرژی الکتریکی و حرارتی

همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد سیستم ترکیبی معرفی شده جهت تامین انرژی یک واحد مسکونی متداول در چهار شهر مختلف شامل آبادان، بصره، بغداد و تهران به کار گرفته خواهد شد. در این بخش به بررسی پارامترهای ساختمان مورد بررسی و نحوه انجام محاسبات آن پرداخته خواهد شد. در این پژوهش، یک واحد آپارتمانی با ابعاد ۱۳۰ مترمربع دارای دو اتاق خواب و یک آشپزخانه به‌ترتیب با مساحت‌های ۱۲ و ۱۵ مترمربع در نظر گرفته شده است. برای هر اتاق نیز یک پنجره و درب در نظر گرفته خواهد شد. این محاسبات توسط نرم‌افزار کریر (Carrier) بخش ساختمانی انجام خواهد گرفت. در این نرم‌افزار جنس تمامی مصالح موجود بوده و می‌توان انرژی گرمایشی مورد نیاز را محاسبه نمود. همچنین برای انرژی الکتریکی مصرفی این واحد ساختمانی از تخمین ارائه شده توسط علایی و همکاران [14] استفاده شده است.

لذا با استفاده از نرم‌افزار کریر و اطلاعات مرجع [14] میزان مصرف انرژی واحد مسکونی قابل محاسبه بوده و انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی سیستم ترکیبی حاصل از حل عددی مطالعه حاضر به راحتی با مقادیر مورد نیاز برای ساختمان مقایسه خواهند شد.

خانه مسکونی به مساحت ۱۳۰ متر مربع در نظر گرفته شده است. مشخصه های فیزیکی این خانه بدین صورت است که تمامی دیواره‌ها بتن سبک کار شده است، کف واحد مسکونی بر روی زمین قرار دارد و در تبادل گرما با سطح زمین می‌باشد، سقف عایق ایزوگام، چهار سمت واحد مسکونی در تبادل انتقال حرارت با محیط اطراف می‌باشد، یک درب ورودی از جنس

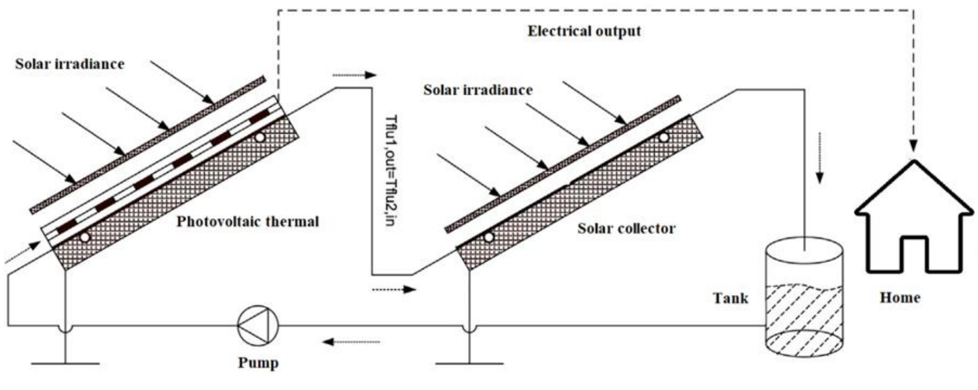
چوب و ۴ پنجره دو جداره الومینومی در نظر گرفته شده است. تمامی مشخصه‌ها توسط نرم‌افزار کریر مدل شده است و ابعاد دیواره و درب و پنجره‌ها متناسب با استاندارد ملی ساختمان ایران در نظر گرفته شده است. سامانه روشنایی و تمام تجهیزات برقی طبق برنامه روزانه یک خانوار در نظر گرفته شده است. بدین صورت که سامانه روشنایی در ساعات پایانی شب خاموش می‌شود، یخچال به طور مداوم روشن می‌باشد، مابقی وسایل الکترونیکی طبق برنامه روزانه یک خانواده می‌باشد و میزان مصرف و گرمایی که تولید می‌کنند در نرم‌افزار درج شده است. نوع سامانه گرمایشی این واحد مسکونی پکیج در نظر گرفته شده است که با استفاده از ۴ رادیاتور هر کدام به مساحت ۲ متر مربع در تمامی منزل توزیع می‌شود. سامانه گرمایشی در ۶ ماهه پاییز و زمستان فعال در نظر گرفته شده است. در این واحد مسکونی علاوه بر سامانه گرمایش یک سامانه سرمایش نیز در نظر گرفته شده است، ما در این نرم‌افزار از کولر ابی استفاده کرده ایم. طبق برنامه و در ۳ ماه تابستان فعال است. تعداد افراد ساکن در منزل ۳ نفر در نظر گرفته شده است که در روزهای تعطیل آخر هفته دارای حداقل فعالیت و در روزهای دیگر دارای فعالیت روزانه معمولی می‌باشند. همچنین برای انرژی الکتریکی مصرفی این واحد ساختمانی از تخمین ارائه شده توسط علایی و همکاران [14] استفاده شده است که در جدول (۱) محاسبات و تخمین مصرف برق آورده شده است. شایان ذکر است، همانطور که قبلا نشان داده شد، به‌منظور بدست آوردن داده‌های آب و هوایی شهرهای منتخب از نرم‌افزار (SAM) استفاده خواهد شد.

جدول ۱ متوسط مصرف برق در طول یک ماه تخمین زده شده توسط علایی و همکاران [14]

وسیله برقی	انرژی مصرفی (W)	میانگین ساعت مورد استفاده در طول روز	متوسط مصرف ماهیانه (kW)
دو عدد لامپ معمولی	۲۰۰	۶	۳۶
دو عدد لامپ کم مصرف	۴۰	۵	۶
یخچال	۳۰۰	۲۴	۲۱۶
ماشین ظرف‌شویی	۱۵۰۰	۱	۴۵
اتو	۸۰۰	۱	۲۴
پلوپز	۷۰۰	۱	۲۱
سماور	۵۰۰	۱	۱۵
تلویزیون	۱۵۰	۵	۲۲/۵
آب‌گرم‌کن برقی	۱۳۰۰	۲	۷۸
کامپیوتر و تلفن	۱۵۰	۸	۳۶
سایر	–	–	۶۶/۵
جمع	–	–	۵۶۶

سیستم خورشیدی پیشنهادی

در تحقیق حاضر ترکیبی از یک ماژول‌های PV و کلکتورهای ST، که به عنوان ماژول PVT نامیده می‌شوند، برای خروجی برق و گرما به طور همزمان، بکار برده شده است. در شکل (۶)، مفهوم سامانه هیبریدی PVT-ST و پیکربندی آن در این مطالعه معرفی شده است.



شکل ۶ شماتیک سیستم ترکیبی فتوولتائیک حرارتی و گردآورنده خورشیدی

جدول ۲ خصوصیات و ابعاد هندسی PVT مورد بررسی [15]

ضخامت شیشه	δ_g	۳	mm
چگالی شیشه	ρ_g	۲۲۰۰	kg/m^3
گرمای ویژه شیشه	C_g	۴۸۰	J/kgK
ضریب رسانش شیشه	k_g	۱/۱	W/mK
ضریب جذب شیشه	α_g	۰/۰۵	-
ضریب گسیل شیشه	ϵ_g	۰/۹۲	-
ضریب عبور شیشه	τ_g	۰/۹۳۶	-
ضریب ثابت استفان بولتزمن	σ	$۱/۳۸ \times ۱۰^{-۲۳}$	J/K
ضخامت جاذب	δ_{abs}	۰/۳	mm
چگالی جاذب	ρ_{abs}	۸۹۲۰	kg/m^3
گرمای ویژه جاذب	C_{abs}	۳۸۵	J/kgK
ضریب رسانش جاذب	k_{abs}	۳۹۸	W/mK
طول صفحه پی وی	L	۰/۶۳	m
عرض صفحه پی وی	W	۰/۵۴	m
ضخامت صفحه پی وی	δ_{pv}	۰/۳	mm
گرمای ویژه پی وی	C_{pv}	۷۰۰	J/kgK
ضریب رسانش پی وی	k_{pv}	۸۴	W/mK
پکینگ فکتور	r_{pv}	۰/۹۴	–
ضریب جذب پی وی	α_{pv}	۰/۹۵	–
ضریب دمای پی وی	β_{pv}	۰/۰۰۴۵	1/K
قطر لوله	D	۸	mm
ضخامت لوله	δ_{tube}	۱	mm
حجم تانک	V	۰/۲	m^3

شکل ۶شکل (۶) نمودار PVT-ST را به‌منظور تامین همزمان برق و انرژی حرارتی مورد نیاز برای یک واحد مسکونی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، PVT-ST شامل دو قسمت مجزا از PVT و ST است که با یک خط لوله متصل می‌شوند. سیستم PVT از لایه های مختلفی تشکیل شده است، از جمله، از بالا به پایین، پوشش شیشه‌ای، پانل PV، صفحه جاذب، لوله‌ها و عایق. سیستم ST شامل یک پوشش شیشه‌ای در بالای صفحه جاذب برای افزایش جذب خورشیدی توسط صفحه جاذب، لوله‌های متصل به صفحه جاذب و عایق است. کلکتور خورشیدی از مس با لوله‌های مارپیچ ساخته شده است. خواص هندسی و ترموفیزیکی هر جزء در جدول ۲) آورده شده است. در محاسبات ما از ترکیب یک PVT و یک کالکتور استفاده کردیم و خصوصیات و ابعاد مورد نظر درجدول (۲) آمده است. لازم به ذکر است ابعاد PVT و ST کاملا مشابه یکدیگر هستند.

معادلات حاکم و شیوه حل آن‌ها

هدف مطالعه حاضر ساخت یک مدل گذرا است که تمام لایه‌های مختلف را شامل می‌شود که شامل پوشش شیشه‌ای، صفحه PV، صفحه جاذب، لوله‌ها و عایق‌ها می‌شود. برای حل معادلات حاکم از کد فرترن استفاده شده است. برخی از مفروضات برای استخراج مدل‌سازی ریاضی به‌صورت زیر استفاده می‌شوند:

۱. سیال تراکم ناپذیر، یکنواخت و تک بعدی (محوری) است [15].

۲. خواص سیال عامل وابسته به دما است.

۳. آسمان جسم سیاهی است و درجه حرارت آن بر مبنای دمای

محیط محاسبه می‌شود [15].

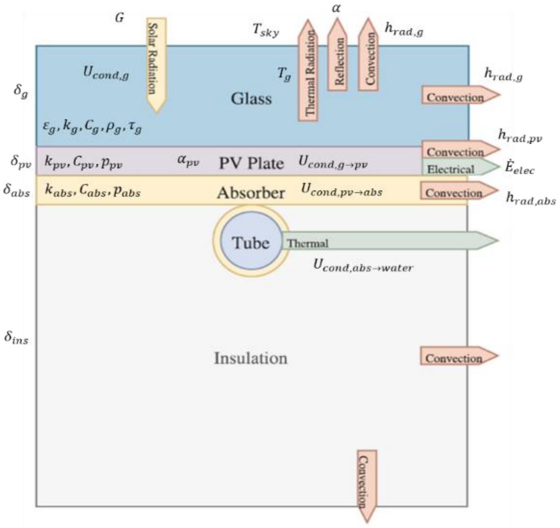
۴. از آنجایی که ضخامت صفحات خیلی کم است، هر لایه به‌صورت توده ای و دارای ضخامت یک سلول در نظر گرفته می‌شود [15].

۵. تابش خورشیدی مستقیم و عمود بر سطح است PV [16,17].

۶. تلفات اهمی در سلول‌های خورشیدی ناچیز است [18].

مدل‌سازی سیستم فتوولتائیک حرارتی

بر اساس مفروضات مدل پیشنهادی، معادلات انرژی لایه‌های مختلف برای حل در کد فرترن استخراج شده‌اند. همانطور که در شکل (۷) نشان می‌دهد، ماژول PVT دارای لایه های مختلفی است، یعنی پوشش شیشه‌ای، صفحه PV، صفحه جاذب، دیواره لوله، مایع خنک کننده و عایق. علاوه بر این، انرژی ورودی و خروجی یک ماژول PVT در شکل (۷) نشان داده شده است. در این کار، عایق به عنوان یک ماده غیر ایده آل در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۷ شماتیک و تعادل انرژی ماژول PVT

معادلات حاکم به همراه روابطی که جهت محاسبه بازده‌های مختلف این سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند در این بخش به‌طور کامل اشاره شده‌اند. برای لایه‌های مختلف سامانه فتوولتائیک حرارتی شامل شیشه، سلول خورشیدی و صفحه جاذب بعلاوه لوله آب است که می‌بایست معادلات انرژی حل گردد. در ابتدا به معادله انرژی شیشه اشاره می‌گردد. در این رابطه شار خورشید و همچنین اتلافات گرمایی به محیط از طریق جابجایی و تشعشع در نظر گرفته شده است. معادله انرژی برای شیشه به شکل زیر است:

$$\rho_g\delta_g c_g\frac{dT_g}{dt}=\alpha_g G-h_{rad,g\to env}\left(T_g-T_{sky}\right)-h_{wind}\left(T_g-T_{amb}\right)+U_{cond,g\to pv}\left(T_{pv}-T_g\right)+\delta_g\nabla.\left(k_g\nabla T_g\right) \quad (۱)$$

در این رابطه ρ، δ، α و c به‌ترتیب چگالی، ضخامت، ضریب جذب و گرمای ویژه می‌باشد. همچنین G تشعشع خورشید بر واحد سطح و g، sky و amb به‌ترتیب نماد شیشه، آسمان و محیط می‌باشند. $h_{rad,g\to env}$، h_{wind} و $U_{cond,g\to pv}$ به‌ترتیب ضریب هدایت تشعشع شیشه به محیط، ضریب هدایت جابجایی به محیط و ضریب هدایت کلی بین شیشه و سلول خورشیدی که با نماد pv نشان داده شده است می‌باشند. دو ضریب هدایت تشعشع شیشه و جابجایی به محیط از روابط (۱) و (۳) محاسبه می‌گردند [19]:

$$h_{rad,g\to env}=\varepsilon_g\sigma\left({T_g}^2+{T_{sky}}^2\right)\left(T_g+T_{sky}\right) \quad (۱)$$

$$h_{wind}=\begin{cases}5.7+3.8V_{wind}, & V_{wind}<5\,\frac{m}{s}\\ 6.47+{V_{wind}}^{0.78}, & V_{wind}\geq 5\,\frac{m}{s}\end{cases} \quad (۳)$$

در رابطه (۲)، ε_g و σ به‌ترتیب ضریب گسیل شیشه و ضریب ثابت استفان بولتزمن (Stefan Boltzman constant) بوده و در رابطه (۳) V_{wind} سرعت باد است. همچنین ضریب کلی انتقال حرارت از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$U_{cond,g\to pv}=\frac{1}{\frac{\delta_g}{2k_g}+\frac{\delta_{pv}}{2k_{pv}}+R''_{g\to pv}} \quad (۲)$$

که در این رابطه $R''_{g\to pv}$ مقاومت تماسی گرمایی بین شیشه و سلول خورشیدی است. دماهای نشان داده شده در رابطه شامل T_{sky}، T_{amb}، T_{pv} و T_g به‌ترتیب مربوط به آسمان، محیط، سلول خورشیدی و شیشه است. دمای آسمان از رابطه زیر به دست می‌آید [20]:

$$T_{sky}=0.0552{T_{amb}}^{1.5} \quad (۳)$$

برای نوشتن معادله انرژی سلول خورشیدی باید به این نکته توجه نمود که بخشی از انرژی که از شیشه عبور می‌کند مستقیما به الکتریسیته تبدیل می‌شود. لذا معادله انرژی سلول‌های خورشیدی به شکل زیر خواهد بود:

$$\rho_{pv}\delta_{pv}C_{pv}\frac{dT_{pv}}{dt}=\alpha_{pv}\tau_g G-U_{cond,pv\to ab}\left(T_{pv}-T_{ab}\right)$$
$$-U_{cond,g\to pv}\left(T_{pv}-T_g\right)-\dot{E}_{el}+\delta_{pv}\nabla.\left(k_{pv}\nabla T_{pv}\right)$$

(۵)

در رابطه بالا τ_g، T_{ab}، $U_{cond,pv\to ab}$ و $\dot{E}_{el}$ به‌ترتیب ضریب عبور شیشه، دمای صفحه جاذب، ضریب هدایت (Conduction) کلی بین سلول‌های خورشیدی و صفحه جاذب و نرخ الکتریسیته تولیدی بر واحد سطح سلول‌ها بوده که این نرخ تابعی از دمای سلول است که مطابق رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد [21]:

$$\dot{E}_{el}=-K_1\beta T_{pv}+K_2 \quad , \quad K_1=\tau_g G\eta_0 r$$
$$K_2=K_1(1+298\beta)$$

(۴)

β ، K_1 و K_2 به‌ترتیب ثوابتی هستند که بر اساس نوع سلول خورشـیدی انتخابی تعیین می‌گردند و η_0 راندمان الکتریکی هر سلول در دمای مرجع می‌باشد.

در این رابطه، A_{ab}، $A_{ab,t}$ ترتیب مساحت صفحه جاذب و مساحت سطح در تماس با لوله می‌باشد. در رابطه بالا ab و نماد صفحه جاذب می‌باشند. همچنین $U_{cond,ab\to t}$ و $U_{cond,ab\to pcm}$.

برای لوله و جریان سیال نیز معادله(۵) می‌بایست حل گردند که در ادامه ارائه شده‌اند:

$$\rho_f A_f C_f dx\frac{dT_f}{dt}=h_{conv,t\to f}Pdx(T_t-T_f)$$
$$-\dot{m}C_f dx\frac{\partial T_f}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(k_f A_f\frac{\partial T_f}{\partial x}\right)dx$$

(۵)

بر اســاس قانون اول، بازده انرژی حرارتی به‌صــورت داده شده است.

$$\eta_{th}=\frac{\dot{E}_{th}}{\dot{G}''A} \quad (۶)$$

که در آن A مســاحت لایه ها و $\dot{E}_{th}$ به توان حرارتی اشــاره دارد که به شرح زیر است:

$$\dot{E}_{th}=\dot{m}C_p(T_{out}-T_{inlet}) \quad (۷)$$

که در آن T_{out} و T_{inlet} به‌ترتیب دمای خروجی و ورودی مایع خنک کننده هستند. بازده انرژی الکتریکی صفحه PV و به طور کلی ماژول به شرح زیر است.

$$\eta_{elec}=\frac{\dot{E}_{elec}-P_{pump}}{\dot{G}''A} \quad (۸)$$

که در آن η_{elec} ها به طور کلی الکتریکی هستند.

ضــریب هدایت جابجایی در داخل لوله با اســتفاده از عدد ناسلت قابل محاسبه می‌باشد:

$$h_{conv,f\to t}=\frac{Nu_f k_f}{d_t} \quad (۹)$$

عدد ناسلت (Nusselt number (Nu)) نیز برای جریان لایه‌ای با استفاده از رابطه (۱۲) قابل محاسبه است [22]:

$$Nu_f=4.36+\frac{0.086\left(\frac{Re_f Pr_f d_t}{L_t}\right)^{1.33}}{1+Pr_f\left(\frac{Re_f d_t}{L_t}\right)^{0.83}} \quad (۱۲)$$

در رابطه (۱۲)، L_t طول مشخصه لوله، Re عدد بی‌بعد رینولدز (Reynolds) و Pr عدد بی‌بعد پرانتل (Prandtl) بوده که در مرجع [23] نحوه محاسبه آن‌ها توضیح داده شده است.

برای تمامی صفحات کلکتور نیز به طریق مشابه می‌توان معادلات انرژی را نوشت.

علاوه بر این، برای جریان آشــفته، Nu_f توســط رابطه زیر ارزیابی می‌شود [24]:

$$Nu_f=\frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re_f-1000)Pr_f}{1+12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}}\left(Pr_f^{\frac{2}{3}}-1\right)} \quad (۱۰)$$

که در آن f ضــریب اصــطکاک اســت. علاوه بر این، f برای رژیم های جریان آشفته و آرام به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$f=\frac{64}{Re_f} \quad (۱۱)$$

$$f=\frac{1}{(0.79\ln(Re_f-1.64)^2} \quad (۱۲)$$

Re_f و Pr_f به‌ترتیب اعداد رینولدز و پرنتل برای سیال خنک کننده هستند که با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [25]:

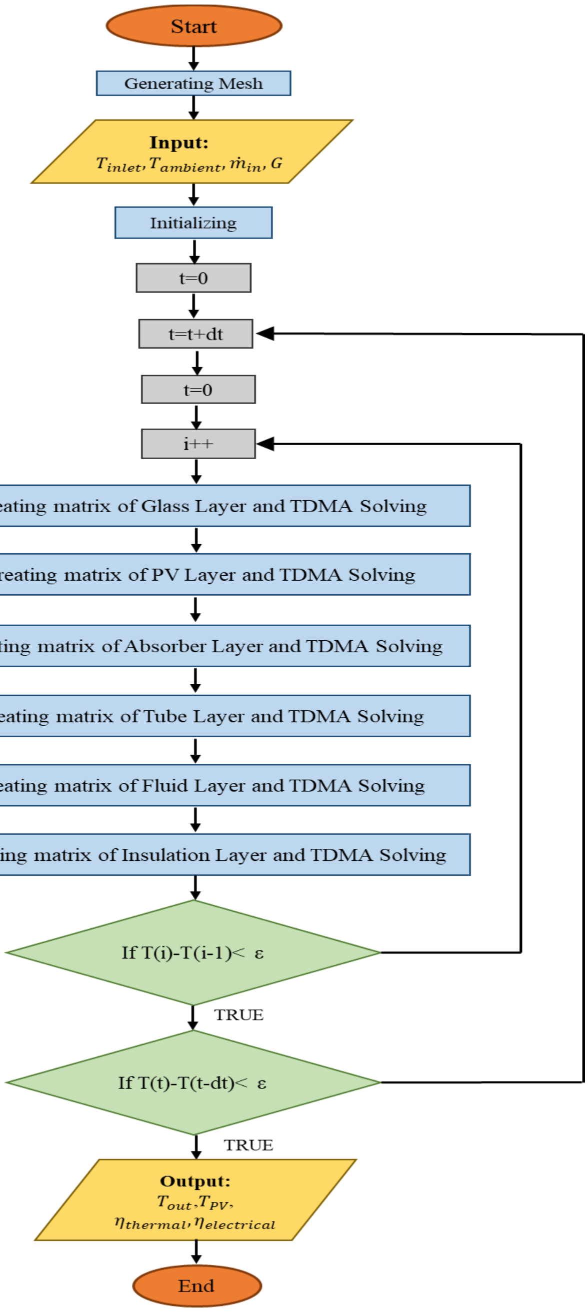
$$Re_f=\frac{4\dot{m}}{\pi d_t\mu_f} \quad (۱۳)$$

$$Pr_f=\frac{C_t\mu_f}{k_f} \quad (۱۴)$$

همانطور که قبلا ذکر شد، برای افزایش دقت مدل به واقعیت، فرض بر این است که عایق ایده‌آل نیست و مقداری اتلاف انرژی در اطراف وجود دارد. بنابراین، معادله انرژی عایق به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\rho_{in}\delta_{in}C_{in}\frac{dT_{in}}{dt}=\frac{A_{in,t}}{A_{in}}U_{cond,t\to in}(T_t-T_{in})+$$
$$\frac{A_{ab,in}}{A_{in}}U_{cond,ab\to in}(T_{ab}-T_{in})-h_{wind}(T_{in}-T_{amb})+$$
$$\delta_{in}\nabla.(k_{in}\nabla T_{in})$$

(۱۸)



شکل ۸ فلوچارت مسئله

برای لایه‌های شیشه، PV، جاذب و عایق، ۹ گروه سلولی مختلف در شبیه‌سازی تعریف شده‌اند که شامل چهار گروه در لبه‌های مختلف، چهار گروه در گوشه‌های مختلف و سایر سلول‌ها در مرکز هستند. تمامی معادلات بیان شده در این بخش برای عناصر مرکزی لایه ها بیان شده است.

برای انواع دیگر سلول‌ها، انتقال گرمای جابه‌جایی به محیط، $h_{wind}(T - T_{amb})$ بر اساس مکان سلول در نظر گرفته می‌شود. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای سیال خنک کننده به‌صورت دبی جرمی و دما برای ورودی و شیب صفر برای متغیر دما در خروجی تنظیم می‌شود.

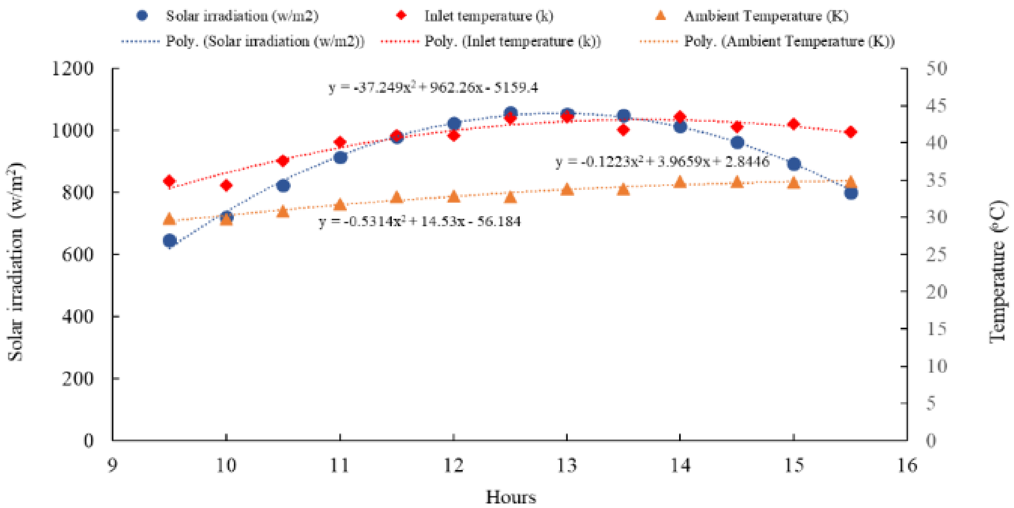
شکل (۸) نمودار جریان مسئله را نشان می‌دهد که شامل دو حلقه برای تکرار زمان و حل معادلات است. در هر حلقه، تمام معادلات به طور ضمنی با استفاده از TDMA حل می‌شوند.

اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد در طول روز

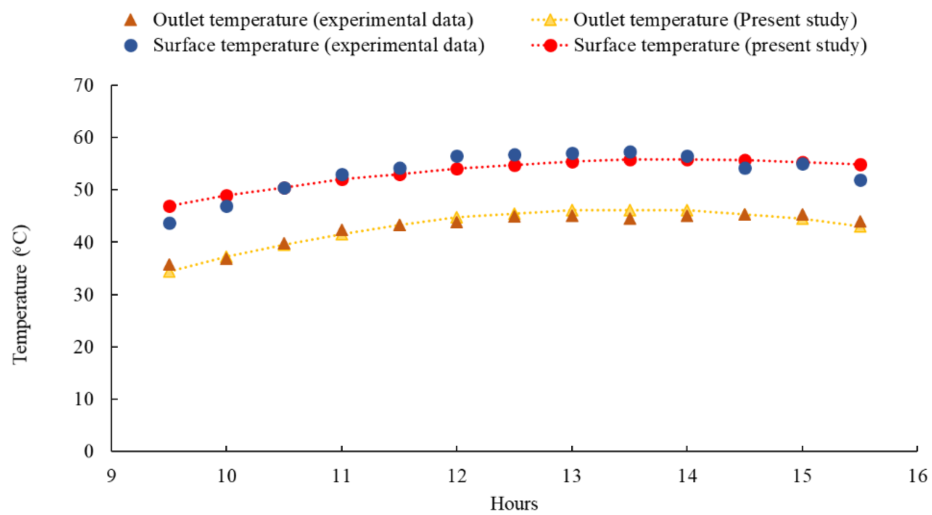
در این بخش، مقایسه‌ای بین عملکرد ماژول‌های مختلف PVT

در طول روز انجام شده است. در مطالعه حاضر، داده‌های ثبت شده از طریق آزمایشی که در دانشگاه فردوسی مشهد (عرض جغرافیایی: ۳۶ درجه و طول جغرافیایی: ۵۹ درجه) در روز معمولی تابستان است، در نظر گرفته شده است [15,26].شکل (۹) داده‌های ثبت شده خود را در طول روز از ساعت ۹:۳۰ صبح تا ۳:۳۰ بعد از ظهر را نشان می‌دهد. داده‌ها برای یافتن خطوط روند درون یابی می‌شوند. همانطور که در شکل(۹) نشان داده شده است، یک خط روند خطی برای دمای محیط در بازه زمانی مورد مطالعه در نظر گرفته شده است، و برای تابش خورشیدی و دمای ورودی در طول بازه زمانی، خطوط روند مرتبه دوم در نظر گرفته شده است.

برای ارزیابی صحت مدل حرارتی پیشنهادی، هم دمای خروجی و هم دمای صفحه PV پیش‌بینی‌شده توسط این مدل، و هم داده‌های تجربی موجود به‌دست‌آمده توسط [15] مقایسه می‌شوند. همانطور که شکل (۱۰) نشان می‌دهد، نتایج قابل قبولی بین نتایج شبیه سازی ها و داده‌های تجربی موجود [15] با میانگین خطاهای ۲٪ و ۱٫۸٪ برای صفحه PV و دمای خروجی ماژول به دست آمده است. بنابراین مدل پیشنهادی از دقت و پایایی کافی برخوردار است.



شکل ۹ داده‌های ثبت‌شده تجربی یک سیستم فتوولتائیک راه اندازی شده [15]



شکل ۱۰ مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی فعلی با داده‌های تجربی ثبت‌شده توسط معادی و همکاران [15]

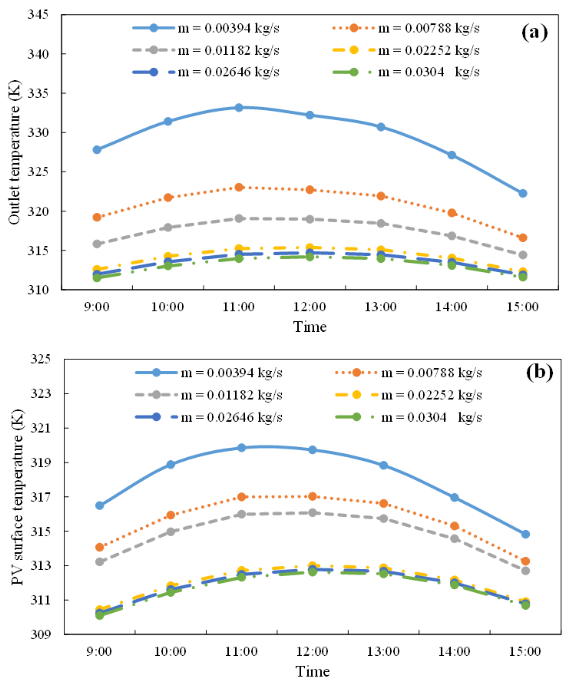
بحث و نتایج

بررسی عملکرد ساعتی سیستم PVT-ST تحت رژیم‌های آرام و آشفته

برای درک رفتار حرارتی و الکتریکی سامانهPVT-ST ، توان الکتریکی و حرارتی تولید شده در یک روز معمولی جولای در تهران بررسی شده است. برای این منظور ابتدا دمای خروجی ساعتی سیال کار و دمای سطح PV مورد بحث قرار می‌گیرد. نتایج در شکل (۱۱) برای نرخ‌های جریان جرمی مختلف برای در نظر گرفتن هر دو رژیم آرام و آشفته ترسیم شده است. بنابراین برای رژیم آرام سه دبی جرمی ۰,۰۰۳۹۴، ۰,۰۰۷۸۸ و ۰,۰۱۱۸۲ کیلوگرم بر ثانیه و برای رژیم آشفته سه دبی جرمی ۰,۰۲۲۵۲، ۰,۰۲۶۴۶ و ۰,۰۳۰۴ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

مطابق شکل (۱۱–الف)، دمای خروجی در حدود ساعت ۱۱:۰۰ صبح برای همه نرخ‌های جریان جرمی به حداکثر افزایش می‌یابد، زمانی که سامانه مقدار بیشتری تابش خورشیدی دریافت می‌کند. علاوه بر این، نرخ جریان جرمی در رژیم آرام دارای دمای خروجی بالاتری نسبت به رژیم آشفته است. تنظیم ساعت ۱۱:۰۰ صبح به عنوان مبنای مقایسه، با استفاده از دبی جرمی ۰,۰۰۳۹۴ کیلوگرم بر ثانیه، دمای خروجی را در حدود ۳۳۳,۱۶ کلوین فراهم می‌کند، که با دبی جرمی ۰,۰۱۱۸۲ کیلوگرم بر ثانیه به ۳۱۹,۱ کلوین (با کاهش ۴,۲ درصدی) کاهش می‌یابد. استفاده از جریان آشفته دمای خروجی را حتی بیشتر کاهش می‌دهد. با این حال، با افزایش نرخ جریان جرمی از ۰,۰۲۲۵۲ به ۰,۰۳۰۴ کیلوگرم بر ثانیه، دمای خروجی در ساعت ۱۱:۰۰ صبح تنها ۰,۴٪ کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که اثر دبی جرمی بر دمای خروجی با افزایش دبی جرمی به ویژه در رژیم آشفته کاهش می‌یابد.

در دبی جرمی‌های پایین تر به دلیل ضرایب انتقال حرارت بیشتر و در نتیجه انتقال حرارت ضعیف تر از طریق لوله منجر به افزایش دمای خروجی لوله و دمای سطح PV می‌شود. به عنوان مثال، بالاترین دمای سطح PV متعلق به سیستمی با دبی جرمی ۰,۰۰۳۹۴ کیلوگرم بر ثانیه است، در حالی که با استفاده از دبی جرمی ۰,۰۳۰۴ کیلوگرم بر ثانیه (جریان آشفته) می‌توان دمای PV را نزدیک به ۷,۵ K کاهش داد. به طور مشابه، کاهش دمای PV در رژیم آرام بارزتر است.



شکل ۱۱ نمودار های دمای خروجی و راندمان حرارتی روزانه کالکتور خورشیدی در شهر های آبادان، بصره، بغداد و تهران

سیستم‌های ترکیبی فتوولتائیک حرارتی/کالکتور خورشیدی

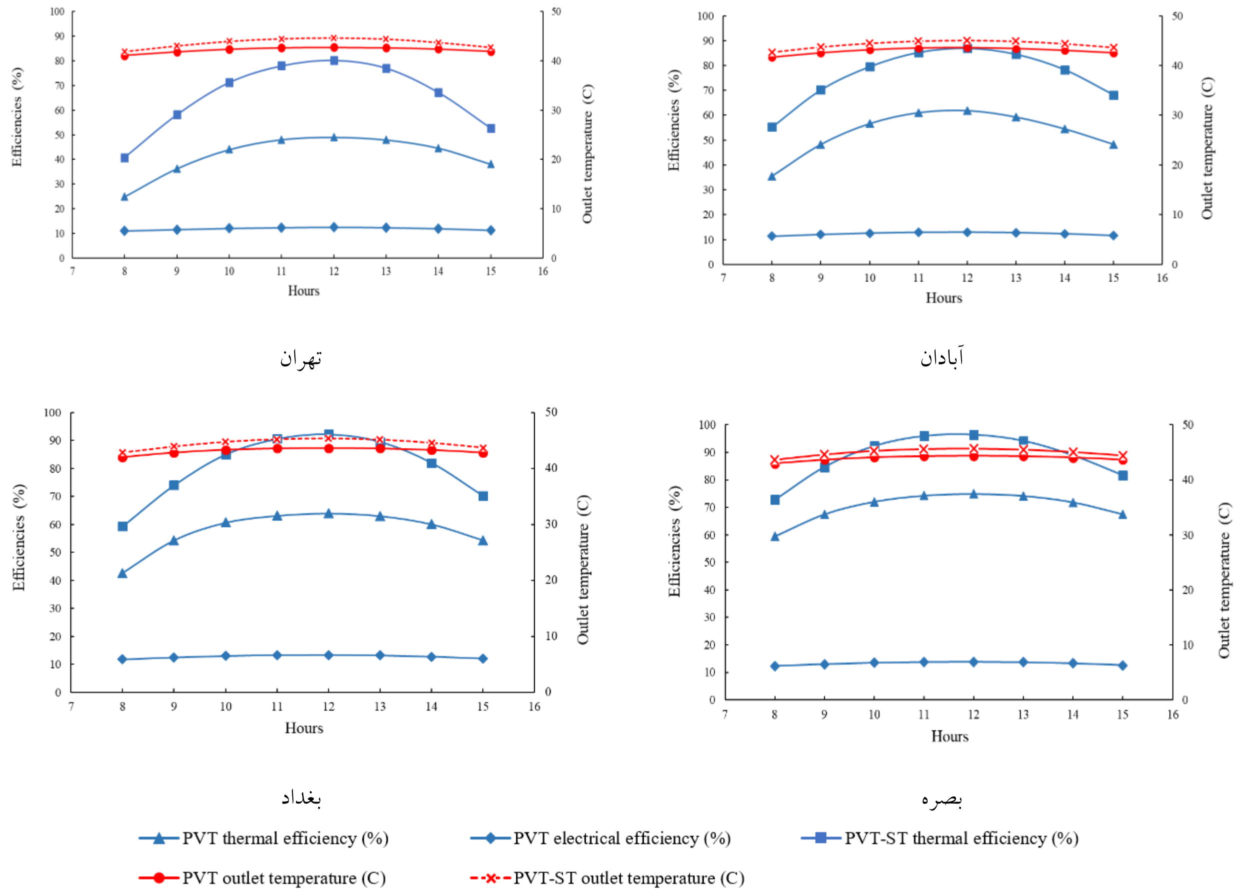
در نهایت، در این بخش، عملکرد سیستم پیشنهادی تحت شرایط آب و هوایی در چهار شهر تهران، آبادان، بغداد و بصره به مدت شش ماه از سال مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که هر چهار شهر دارای آب و هوای گرم با تابش خورشیدی و دمای محیط بالا هستند. همچنین بر اساس نتایج برای دبی جرمی (مقایسه رژیم آرام و آشفته)، دبی جرمی ۰,۰۳۰۴ کیلوگرم بر ثانیه به دلیل برتری در ایجاد توان حرارتی و الکتریکی بالاتر برای این بخش انتخاب شده است.

ابتدا دمای خروجی سیال کار در شکل (۱۲) بین ساعت ۸:۰۰ صبح تا ۳:۰۰ بعد از ظهر بررسی شده است. روند مشابهی را می‌توان برای دمای خروجی در شهرهای مختلف مشاهده کرد. با توجه به شکل، حداکثر دمای خروجی را می‌توان در ماه جولای و به دنبال آن در سپتامبر و می به دست آورد. لازم به ذکر است که دمای خروجی به دمای محیط بستگی دارد که در مطالعه حاضر به عنوان دمای ورودی در نظر گرفته شده است. از این رو، به عنوان مثال، در جولای، تهران به دلیل دمای ورودی پایین تر، دمای خروجی کمتری تولید می‌کند، در حالی که آبادان به دلیل دمای ورودی بالاتر، دمای خروجی بالاتری دارد.

شکل (۱۲) تغییرات توان حرارتی و الکتریکی را بر حسب زمان در یک روز در ژانویه، مارس، مه، ژوئیه، سپتامبر و نوامبر برای (الف) تهران، (ب) آبادان، (ج) بغداد، و (د) بصره نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن این رقم برای تهران، به لطف دمای بالاتر خروجی در تیرماه، حداکثر توان حرارتی در این ماه به دست آمده است. از نظر توان الکتریکی، اگرچه افزایش تابش خورشیدی سهم تولید الکتریسیته را بهبود می‌بخشد، دمای سلول PV نیز افزایش می‌یابد که منجر به کاهش تولید برق می‌شود. البته طبق شکل، این سیستم در تمامی شهرها می‌تواند حداکثر توان الکتریکی را در ماه جولای تولید کند.

به طور کلی، سیستم PVT-ST پیشنهادی می‌تواند راندمان حرارتی رضایت بخشی را در مقایسه با سایر سیستم‌ها با مساحت کل کلکتور برابر تحت شرایط کاری یکسان به دست آورد، در حالی که در تولید برق عملکردی یکسان دارند. در همین حال، سامانه PVT-ST پیشنهادی از نظر انرژی حرارتی، با دمای آب خروجی بالاتر نسبت به ماژول‌های PVT معمولی، همراه با تولید انرژی راندمان و عملکرد بهتری را دارد. به طور همزمان، سامانه PVT-ST می‌تواند مقدار قابل توجهی گرما را به عنوان مکمل جزئی برای ساختمان ها تولید کند.

در بررسی دمای آب ورودی میتوان ذکر کرد که آب با دمای بالاتر انرژی حرارتی کمتری را جذب می‌کند. به عبارت دیگر، انرژی حرارتی بیشتری به سلول‌های PV هدایت می‌شود که منجر به افزایش دمای خروجی و کاهش در راندمان حرارتی می‌شود. همانطور که درشکل (۱۲) نشان داده شده است، با فرض استفاده از آب داخل تانک (دمای آب ورودی را برابر با دمای محیط در نظر گرفته‌ایم)، مشاهده می‌شود شهر بصره بالاترین راندمان حرارتی را نسبت به باقی شهر ها دارا می‌باشد. هرچند شدت تابش در شهر بصره به میزان قابل توجهی از باقی شهرها بیشتر است.

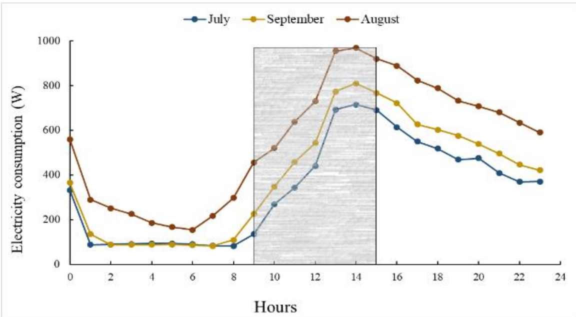


شکل ۱۲ نمودار دمای روزانه و همچنین راندمان‌های حرارتی و الکتریکال برای چهار شهر آبادان، بصره، بغداد و تهران

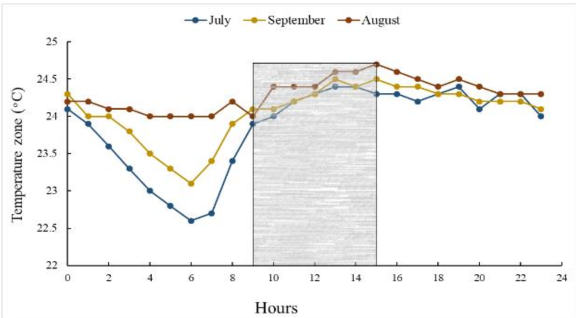
بررسی منزل مسکونی

همانطور که در قسمت ۳ ذکر شد برای بررسی سیستم انرژی یک منزل مسکونی و تامین آن با سامانه ترکیبی PVT-ST، خانه‌ای به مساحت ۱۳۰ مترمربع در نظر گرفته شد است که تمامی اطلاعات مربوط به منزل مسکونی در آن قسمت توضیح داده شد. نحوه بررسی بدین صورت است که ابتدا در سه ماهه گرم سال با استفاده از نرم‌افزار Carrier میزان برق مصرفی خانه را در ساعات مختلف روز حساب کرده شکل (۱۳) و شکل (۱۴)

شکل ۱۴) سپس با استفاده از سیستم ترکیبی برای تامین برق مصرفی خانه مقایسه میکنیم. این نکته حائز اهمیت است که ساعات اوج مصرف برق یعنی ۹:۰۰ صبح تا ۱۵:۰۰ عصر مورد بررسی قرار گرفته است. توان تولیدی سیستم در ساعات مختلف متفاوت بوده به طوری این سامانه ترکیبی در اوج تابش افتاب نزدیک به ۷۷ وات برق تولید میکند. همچنین می‌توان با استفاده از روابط معادی و همکاران [27] مقدار توان حرارت تولید شده در سیستم ترکیبی را به الکتریکی معادل کرد.

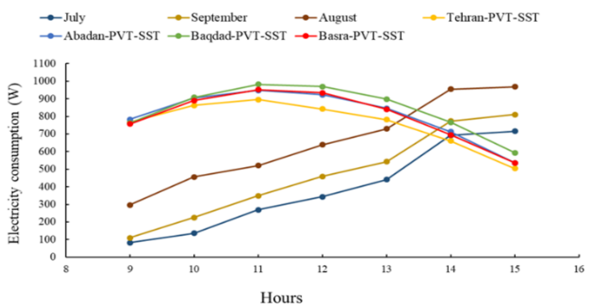


شکل ۱۳ نمودار ساعتی میزان برق مصرفی در سه ماهه سرد گرم تابستان با استفاده از نرم‌افزار کریر



شکل ۱۴ نمودار ساعتی تغییرات دمای محیط خونه در سه ماه تابستان

در این قسمت به بررسی میزان برق مصرفی در سه ماهه گرم سال یعنی تابستان میپردازیم. در این بررسی ماه‌های جولای، آگوست و سپتامبر را مورد بررسی قرار دادیم. سامانه سرمایش کولر آبی می‌باشد که از روش سرمایش تبخیری غیرمستقیم جهت خنک سازی استفاده می‌کند. در این نوع سیستم تبخیر غیر مستقیم هوای خنک شده به طور مستقیم وارد محیط تنفس نمی‌شود بلکه با عبور از یک مبدل موجب خنک کردن هوایی می‌شود که قرار است وارد محیط سرمایش شود و جریان هوای دوم وارد منزل مسکونی می‌شود. این روش برای مناطقی مفید است که رطوبت هوا بالاست. دمای مطلوب داخل منزل مسکونی همانند سه ماهه گرم ۲۷ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است.در شکل (۱۳) و شکل (۱۴) قابل مشاهده است که ماه آگوست به دلیل تابش شدید آفتاب و گرمای زیاد بیشترین میزان مصرف برق را داریم. سپس با فرض ۸ سامانه موازی برای تامین برق خانه مسکونی در سه ماهه گرم سال به مقایسه توان تولیدی برق میپردازیم. همانطور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود در ساعات ابتدایی روز به دلیل تابش بیشتر افتاب و عدم استفاده از سیستم‌های روشنایی میزان برق تولیدی تا قبل از ساعت ۱۳ به خوبی پاسخگوی مصرف خانگی است به‌صورتی که میتوان حتی مازاد برق تولیدی را ذخیره نمود. همچنین در ساعات ابتدایی روز به دلیل عدم استفاده از تجهیزات روشنایی میزان برق تولیدی از برق مصرفی بیشتر است و مانند قبل میتوان برق تولیدی را تا قبل از ساعت ۱۳ ذخیره نمود. اما بعد از ساعت ۱۳ در شکل (۱۵) به دلیل استفاده بیشتر از تجهیزات الکرونیکی میزان مصرف افزایش میابد به طوری که برق تولیدی توان تامین مصرف خانه را ندارد. اما همانطور که ذکر شد در ساعات ابتدایی روز به دلیل کمینه بودن میزان مصرف می‌توان برق تولیدی را ذخیره نمود و در ساعات اوج مصرف از آن ظرفیت استفاده نمود.



شکل ۱۵ نمودار ساعتی میزان برق مصرفی در سه ماهه سرد گرم برای سرمایش خانه و مقایسه آن با سیستم موازی در چهار آب و هوای مختلف

نتیجه‌گیری

این مطالعه عددی عملکرد یک سیستم خورشیدی جدید معرفی شده به نام ماژول PVT و کلکتور ST را به‌صورت سری (-PVT

ST) ارزیابی کرد که می‌تواند انرژی حرارتی با دمای بالا و همچنین توان الکتریکی را به طور همزمان تولید کند. بدین منظور عملکرد سامانه از نظر قوانین اول و دوم ترمودینامیک در چهار شهر ایران و عراق مورد بررسی قرار گرفت. این شهرها شامل تهران، آبادان، بغداد و بصره بودند که برای روزهای آفتابی مناسب با شدت تابش خورشیدی بالا در طول سال انتخاب شدند. علاوه بر این، اثرات رژیم سیال انتقال حرارت، از جمله رژیم‌های آرام و آشفته، بر عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، مقایسه‌ای بین PVT-ST و سیستم‌های PVT تک و تک ST انجام شد. یافته های این مطالعه به شرح زیر است:

۱. با توجه به مطالعه رژیم سیال کاری، دمای خروجی در رژیم آرام، به دلیل ضریب انتقال حرارت بیشتر و سرعت جریان جرمی، بالاتر از رژیم آشفته است. دمای سطح PV در رژیم آشفته پایین‌تر از جریان آرام است. علاوه بر این، اثر دبی جرمی بر دمای خروجی با افزایش دبی جرمی به ویژه در رژیم آشفته کاهش یافت.

۲. قدرت حرارتی با افزایش دبی جرمی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، جایی که در بالاترین تابش خورشیدی در تیرماه در تهران، با تغییر دبی جرمی از ۰،۰۰۳۹۴ کیلوگرم بر ثانیه به ۰،۰۳۰۴ کیلوگرم بر ثانیه، توان حرارتی از ۵۵۸ به ۷۲۲ وات بر متر مربع افزایش یافت.

۳. با مقایسه راندمان حرارتی سیستم‌های PVT-ST، تک PVT و تک ST در تیرماه در تهران، بازده حرارتی بهینه برای سیستم تک ST در دبی جرمی ۰،۰۳۰۴ کیلوگرم بر ثانیه و معادل ۸۵،۷ درصد به دست آمد. توسط سیستم‌های PVT-ST و PVT به‌ترتیب با ۷۸٪ و ۷۲،۹٪. علاوه بر این، حداکثر بازده الکتریکی در بالاترین نرخ جریان جرمی، برابر با ۱۲،۵۶٪ برای هر دو سامانه PVT-ST و PVT به دست آمد.

۴. سیستم PVT-ST با افزایش تابش خورشیدی می‌تواند آب گرم را در دمای بالاتری نسبت به سیستم PVT فراهم کند. یعنی تحت تابش زیاد، سیستم PVT-ST مزایای بیشتری دارد، اما این مزیت به تدریج با افزایش دمای آب ورودی کاهش می‌یابد.

۵. سیستم‌های ترکیبی توان تامین بیشتر برق مصرفی یک خانه مسکونی را دارند اما باید این نکته را در نظر داشت که در ساعات اوج مصرف این مقدار تولید برق پاسخگوی ظرفیت خانه نمی‌باشد که میتوان هم از برق ذخیره شده از باطری استفاده نمود و هم اینکه می‌توان کسری از کمبود برق را از شبکه شهری تامین نمود.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] A. Kazemian, A. Parcheforosh, A. Salari, and T. Ma, "Optimization of a novel photovoltaic thermal module in series with a solar collector using Taguchi based grey relational analysis," *Solar Energy*, vol. 215, pp. 492-507, 2021. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.006

[2] S. Farah, W. Saman, and M. Belusko, "Integrating solar heating and PV cooling into the building envelope," *in Sustainability in Energy and Buildings: Springer*, vol. 22, pp. 887-901, 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36645-1_79

[3] S. Fakouriyan, Y. Saboohi, and A. Fathi, "Experimental analysis of a cooling system effect on photovoltaic panels' efficiency and its preheating water production," *Renewable Energy*, vol. 134, pp. 1362-1368, 2019. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.054

[4] Z. Han, K. Liu, G. Li, X. Zhao, and S. Shittu, "Electrical and thermal performance comparison between PVT-ST and PV-ST systems," *Energy*, vol. 237, pp. 121589, 2021. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121589

[5] Chandan, V. Suresh, S. Md. Iqbal, K. S. Reddy, and B. Pesala, "3-D numerical modelling and experimental investigation of coupled photovoltaic thermal and flat plate collector," *Solar Energy*, vol. 224, pp. 195-209,

2021. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.079

[6] A. Al-Salaymeh, Z. Al-Hamamre, F. Sharaf, and M. R. Abdelkader, "Technical and economical assessment of the utilization of photovoltaic systems in residential buildings: The case of Jordan," *Energy conversion and management*, vol. 51, no. 8, pp. 1719-1726, 2010. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.026

[7] T. Ma, H. Yang, W. Gu, Z. Li, and S. Yan, "Development of walkable photovoltaic floor tiles used for pavement," *Energy Conversion and Management*, vol. 183, pp. 764-771, 2019. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.035

[8] M. Li, T. Ma, J. Liu, H. Li, Y. Xu, W. Gu, and L. Shen, "Numerical and experimental investigation of precast concrete facade integrated with solar photovoltaic panels," *Applied Energy*, vol. 253, pp. 113509, 2019. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113509

[9] T. Ma, J. Zhao, and Z. Li, "Mathematical modelling and sensitivity analysis of solar photovoltaic panel integrated with phase change material," *Applied Energy*, vol. 228, pp. 1147-1158, 2018. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.145

[10] L. W. Florschuetz, "Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors," *Solar energy*, vol. 22, no. 4, pp. 361-366, 1979. https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90190-7

[11] H. A. Zondag, W. G. J. Van-Helden, M. Bakker, P. Affolter, W. Eisenmann, H. Fechner, M. Rommel, A. Schaap, H. Soerensen, and Y. Tripanagnostopoulos, "PVT roadmap. A European guide for the development and market introduction of PVT technology," 2006.

[12] M. Valizadeh, F. Sarhaddi, and M. M. Adeli, "Exergy performance assessment of a linear parabolic trough photovoltaic thermal collector," *Renewable Energy*, vol. 138, pp. 1028-1041, 2019. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.039

[13] A. Nahar, M. Hasanuzzaman, N. A. Rahim, and S. Parvin, "Numerical investigation on the effect of different parameters in enhancing heat transfer performance of photovoltaic thermal systems," *Renewable Energy*, vol. 132, pp. 284-295, 2019. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.008

[14] R. Alayi, A. Kasaeian, and F. Atabi, "Thermal analysis of parabolic trough concentration photovoltaic/thermal system for using in buildings," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 38, no. 6, p. 13220, 2019. https://doi.org/10.1002/ep.13220

[15] S. R. Maadi, A. Kolahan, M. Passandideh-Fard, M. Sardarabadi, and R. Moloudi, "Characterization of PVT systems equipped with nanofluids-based collector from entropy generation," *Energy Conversion and Management*, vol. 150, pp. 515-531, 2017. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.039

[16] M. Abdolzadeh and T. Zarei, "Optical and thermal modeling of a photovoltaic module and experimental evaluation of the modeling performance," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 277-293, 2017. https://doi.org/10.1002/ep.12493

[17] Z. H. Lu, and Q. Yao, "Energy analysis of silicon solar cell modules based on an optical model for arbitrary layers," *Solar Energy*, vol. 81, no. 5, pp. 636-647, 2007. https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.08.014

[18] N. Dimri, A. Tiwari, and G. N. Tiwari, “Comparative study of photovoltaic thermal (PVT) integrated thermoelectric cooler (TEC) fluid collectors,” *Renewable Energy*, vol. 134, pp. 343-356, 2019. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.105

[19] O. Rejeb, M. Sardarabadi, C. Ménézo, M. Passandideh-Fard, M. H. Dhaou, and A. Jemni, “Numerical and model validation of uncovered nanofluid sheet and tube type photovoltaic thermal solar system,” *Energy Conversion and Management*, vol. 110, pp. 367-377, 2016. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.063

[20] S. R. Maadi, A. Navegi, E. Solomin, H. S. Ahn, S. Wongwises, and O. Mahian, “Performance improvement of a photovoltaic-thermal system using a wavy-strip insert with and without nanofluid,” *Energy*, vol. 234, pp. 121190, 2021. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121190

[21] E. Skoplaki, and J. A. Palyvos, “On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations,” *Solar energy*, vol. 83, no. 5, pp. 614-624, 2009. https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008

[22] Z. Qiu, X. Zhao, P. Li, X. Zhang, S. Ali, and J. Tan, “Theoretical investigation of the energy performance of a novel MPCM (Microencapsulated Phase Change Material) slurry based PV/T module,” *Energy*, vol. 87, pp. 686-698, 2015. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.040

[23] A. Kolahan, S. R. Maadi, A. Kazemian, C. Schenone, and T. Ma, “Semi-3D transient simulation of a nanofluid-base photovoltaic thermal system integrated with a thermoelectric generator,” *Energy Conversion and Management*, vol. 220, pp. 113073, 2020. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113073

[24] T. L. Bergman, F. P. Incropera, D. P. DeWitt, and A. S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 8th th. Reading, MA: John Wiley & Sons, 2018.

[25] W. Daungthongsuk, and S. Wongwises, “A critical review of convective heat transfer of nanofluids,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 11, no. 5, pp. 797-817, 2007. https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.06.005

[26] A. Kolahan, S. R. Maadi, A. Kazemian, C. Schenone, and T. Ma, “Semi-3D transient simulation of a nanofluid-base photovoltaic thermal system integrated with a thermoelectric generator,” *Energy Conversion and Management*, vol. 220, pp. 113073, 2020. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113073

[27] S. R. Maadi, H. Sabzali, A. Kolahan, and D. Wood, “Improving the performance of PV/T systems by using conical-leaf inserts in the coolant tubes,” *Solar Energy*, vol. 212, pp. 84-100, 2020. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.011